doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.015

玉米原茬地高速作业侧向清茬刀设计与试验

陈海涛[1,2]　逯远东[1]　王　星[1]　张　颖[1,3]　喻晨鹏[1]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;2.黑龙江东方学院机电工程学院,哈尔滨 150066;
3.黑龙江省主要农作物生产机械化材料化技术创新中心,哈尔滨 150030)

摘要:针对我国东北地区玉米原茬地免耕播种机高速作业时,播种施肥触土部件堵塞导致播种作业质量降低等问题,改进设计一种适用于高速免少耕播种作业的侧向清茬刀。通过对正切刃折弯曲线及作业过程理论分析,确定了侧向清茬刀的结构和工作参数,构建了清茬防堵装置在田间作业过程中刀齿-土壤-根茬离散元仿真模型,进行了以清茬刀正切刃折弯角、作业速度和刀轴转速为影响因子,根茬清除率、土壤扰动率和当量功耗为评价指标的二次回归正交中心旋转组合仿真试验。依据参数优化仿真结果试制样机并进行田间性能试验,结果表明:在玉米残茬覆盖量 1.73 kg/m^2、平均留茬高度 400 mm、土壤硬度 20.8 kg/cm^2 条件下,当正切刃折弯角 34.5°、作业速度 14.4 km/h、刀轴转速 380 r/min 时性能最优,此时根茬清除率 91.6%、土壤扰动率 26.6%、当量功耗 12.62 kW;安装优化清茬刀的清茬装置比安装侧向清秸刀齿的根茬清除率提高 12.67%。

关键词:清茬刀;免耕播种机;高速作业;玉米根茬;清茬防堵装置

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0163-11　　**OSID**:

Design and Test of Lateral Stubble Clearing Blade for High-speed Operation in Corn Stubble Field

CHEN Haitao[1,2]　LU Yuandong[1]　WANG Xing[1]　ZHANG Ying[1,3]　YU Chenpeng[1]

(1. *College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin* 150066, *China*
3. *Heilongjiang Province Technology Innovation Center of Mechanization and Materialization of Major Crops Production, Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the high speed operation of no-tillage seeder in corn stubble land in Northeast China, the clogging of seeding and fertilizer touching parts leads to the reduction of the quality of seeding operation, etc., the design of a lateral stubble clearing knife suitable for high speed no-tillage seeding operation was improved. Through the theoretical analysis of bending curve of tangent blade and operation process, the structure and working parameters of the lateral stubble knife were determined, and a discrete element simulation model of the blade - soil - root stubble was constructed for the stubble clearing and anti-clogging device in the field operation process, and the quadratic regression orthogonal center was carried out with the bending angle of the tangent blade of the stubble clearing knife, the operation speed and the knife shaft rotation speed as the influencing factors, and the stubble removal rate, the soil disturbing rate, and the equivalent power consumption as the evaluating indexes. Rotary combination simulation test was done. According to the simulation results of parameter optimization, the prototype was manufactured and field performance tests were conducted, and the results showed that under the conditions of corn stubble coverage of 1.73 kg/m^2, average stubble height of 400 mm, and soil hardness of 20.8 kg/cm^2, the performance was optimal when the combination of parameter combinations of the bending angle of the cutting edge of 34.5°, the operating speed of 14.4 km/h, and the cutter shaft rotational speed of 380 r/min were combined. In this case, the root stubble removal rate was 91.6%, soil disturbance rate was 26.6%, and power consumption was 12.62 kW; the stubble removal rate of the stubble removal device with optimized stubble removal knives was increased by 12.67% compared with

收稿日期:2024-02-18　修回日期:2024-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)

作者简介:陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备及生物质材料研究,E-mail:htchen@neau.edu.cn

that of the stubble removal device with lateral stubble removal knife blade.

Key words: stubble clearing blade; no-till planter; high speed operation; corn stubble; stubble clearing device

0 引言

保护性耕作是一种以保护土壤和环境为目的的现代农业生产方式之一。其主要是通过免耕、少耕、秸秆还田、覆盖土壤等措施,减少农田风蚀、水蚀,提高土壤肥力和抗旱能力[1]。玉米原茬地在免耕播种条件下地表存在大量秸秆和残茬,造成播种机通过困难,播种施肥部件堵塞,严重影响播种作业质量和出苗率。因此,残茬清理是制约高质量种床构建的关键要素,有效的防堵装置是保证免耕播种机优质高效作业的前提[2]。

国内外专家学者围绕免耕播种机防堵技术与装置做了大量研究工作[3-7]。目前,免耕播种机的清茬防堵装置主要有被动式与主动式两类。被动清茬防堵装置主要是通过在播种施肥装置前安装拨草轮及破茬圆盘,依靠装置自身重力驱使圆盘入土和滚动,完成切割残茬、混合土秸等效果[8-9]。曹鑫鹏等[10]设计了一种侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置,通过切茬盘对种带上的秸秆根茬进行切分,用拨茬齿盘将种带秸秆拨离并利用土壤覆盖,提高了种带根茬清茬率,抑制了秸秆回垄现象。王加一等[11]设计了一种随动自调刃口角破茬刀,根据刀片不同位置受力差异触动缓冲机构,调整切割角度,达到降低工作阻力、提高破茬率、降低作业油耗的效果。林静等[12]优化设计了一种包括阿基米德螺线锯齿型缺口圆盘破茬刀和星型清垄轮的防缠绕破茬清垄装置,利用离散元仿真分析确定了装置的最优工作参数,破茬率与清秸率均有提高。主动清茬防堵装置[13-15]是依靠拖拉机动力输出轴驱动清茬部件高速旋转,对根茬进行破碎、抛撒等作业。朱惠斌等[16]利用 EDEM - ADAMS 联合仿真技术,设计了一种双轴破茬免耕装置,得到机具最佳参数,水稻秸秆、根茬的切断率和切茬率均符合农艺要求。王立宗等[17]设计了一种适用于高速免耕直播的驱动式开畦沟装置,可实现 12 km/h 的油菜免耕播种作业。陈海涛等[18-20]设计的 2BMFJ 系列免耕覆秸精量播种机,采用侧向清秸防堵抛出整理种床方法,能将种床覆盖的各类秸秆和残茬进行清理实现播后覆盖还田,在作业速度小于 10 km/h 时作业性能优异。被动式清茬防堵装置结构简单成本低、土壤扰动量小、功耗低,工作性能稳定。但对于不同秸秆覆盖量地区适应性较差,在高留茬地及秸秆重度覆盖的情况下堵塞严重。主动式清茬装置破碎效果好,对秸秆覆盖量的适应性强,但功率消耗大,土壤扰动量大,散墒严重,在高速作业时(≥14 km/h)防堵效果不理想。

本文针对东北地区玉米原茬地保护性耕作模式,基于团队前期研究成果优化设计一种适用于高速作业的侧向清茬刀,为玉米原茬地免少耕播种高速(≥14 km/h)精播机研究提供参考依据。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

清茬防堵装置结构如图 1 所示,由机架、清茬刀轴、挡秸板、动力输入轴、侧向清茬刀、地轮、传动机构等组成。其中转动滚筒结构如图 2 所示,由滚筒、刀座、侧向清茬刀组成。

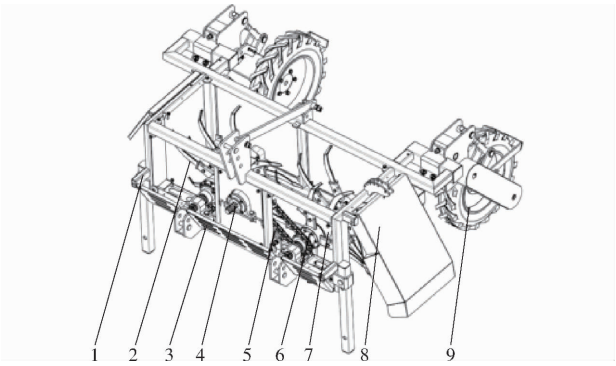

图 1 清茬防堵装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of stubble clearing anti-clogging device

1. 机架 2. 清茬刀 3. 压秸板 4. 动力输入轴 5. 传动链 6. 清茬刀轴 7. 转动滚筒 8. 残茬侧抛控制装置 9. 地轮

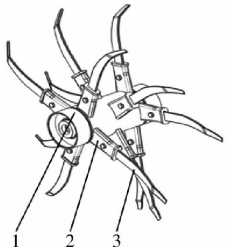

图 2 转动滚筒结构图

Fig. 2 Structure diagram of rotating cylinder

1. 滚筒 2. 刀座 3. 侧向清茬刀

1.2 工作原理

2BMFJ 型免耕播种机为本团队设计的免耕播种机型,其清茬防堵装置在作业时采用三点悬挂与拖拉机挂接,拖拉机动力输出轴带动动力输入轴沿逆时针转动,通过链传动驱动清茬刀轴带动刀齿高速旋转,将根茬的主根及根须切断破碎,连同秸秆抛

撒到机组前进方向左侧，在施肥、播种作业前完成种床整备。

目前防堵装置上装配的侧向清秸圆弧刀为板型刀，在高速作业时仅能实现对地表玉米秸秆清理和玉米根茬的切削功能，对玉米根茬和须根仅起到切削作用，无法将根茬及须根移出种床，导致后续施肥播种部件堵塞，机具无法正常工作。针对上述问题，本研究在侧向清秸圆弧刀的基础上折弯设计一种能够实现玉米根茬和须根清理的侧向清茬刀。

2　侧向清茬刀正切刃设计

2.1　正切刃折弯曲线分析

如图 3 所示，本文设计的清茬刀正切刃展开线是一段平面曲线 $R=R(\theta)$，在 $R_1=R(\theta_1)$ 处绕折弯线 l 折弯角度 φ 形成正切刃，折弯后的正切刃为一条空间曲线。R'表示折弯后正切刃上任意一点的回转半径，折弯后正切刃刃口曲线表示为$R'=R'(\theta')$，θ'为正切刃上任意一点的回转半径 R'与 X 轴夹角。

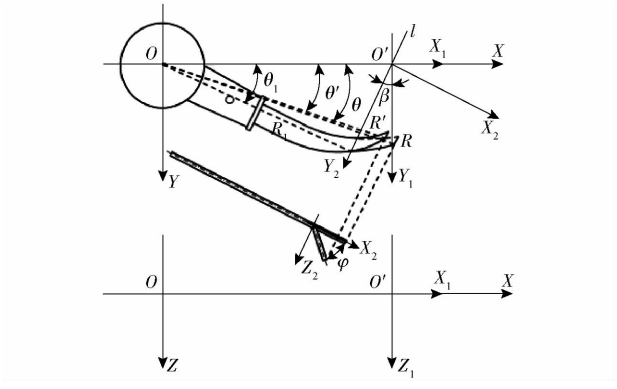

图 3　侧向清茬刀正切刃形成过程

Fig. 3　Formation process of tangent blade of lateral stubble blade

正切刃展开线的直角坐标为

$$\begin{cases} x = R\cos\theta \\ y = R\sin\theta \\ z = 0 \end{cases} \tag{1}$$

引入辅助坐标系 $X_1Y_1Z_1$ 与 $X_2Y_2Z_2$ 得到经过坐标变换后的正切刃展开线的直角坐标(x_1,y_1,z_1)、(x_2,y_2,z_2)为

$$\begin{cases} x_1 = x - l_{OO'} \\ y_1 = y \\ z_1 = z = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} x_2 = R\cos(\theta-\beta) - R_1\cos(\theta_1-\beta) \\ y_2 = R\sin(\theta-\beta) + R_1\cos(\theta_1-\beta)\tan\beta \\ z_2 = z_1 = 0 \end{cases} \tag{3}$$

其中　　$$l_{OO'} = \frac{R_1\cos(\theta_1-\beta)}{\cos\beta}$$

式中　β——正切刃折弯线 l 与 Y_1 轴夹角，(°)

在 $X_2Y_2Z_2$ 坐标系内，将正切刃展开线绕折弯线 l 折弯角度 φ 形成正切刃，此时正切刃坐标为

$$\begin{cases} x_2' = R\cos(\theta-\beta)\cos\varphi - R_1\cos(\theta_1-\beta)\cos\varphi \\ y_2' = R\sin(\theta-\beta) + R_1\cos(\theta_1-\beta)\tan\beta \\ z_2' = R\cos(\theta-\beta)\sin\varphi - R_1\cos(\theta_1-\beta)\sin\varphi \end{cases} \tag{4}$$

从 $X_2Y_2Z_2$ 坐标系经过 $X_1Y_1Z_1$ 坐标系返回 XYZ 坐标系，正切刃坐标为

$$\begin{cases} x' = R(\sin\beta\cos(\theta-\beta)\cos\varphi + \cos\beta\sin(\theta-\beta)) + \\ \qquad R_1\sin\beta\cos(\theta_1-\beta)\left(1-\cos\varphi+\dfrac{1}{\sin\beta\cos\beta}\right) \\ y' = R(\sin\beta\sin(\theta-\beta) - \cos\varphi\cos\beta\cos(\theta-\beta)) + \\ \qquad R_1\cos(\theta_1-\beta)(\cos\varphi\cos\beta + \sin\beta\tan\beta) \\ z' = R\cos(\theta-\beta)\sin\varphi - R_1\cos(\theta_1-\beta)\sin\varphi \end{cases} \tag{5}$$

式(5)为折弯后正切刃上各点参数方程，正切刃上任意一点回转半径 R'计算式为

$$R' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \tag{6}$$

由式(6)可知，正切刃回转半径与正切刃曲线方程及正切刃折弯角度有关。由此可以推导出正切刃上各点的回转半径与极角，设计出符合要求的正切刃。

2.2　侧向清茬刀作业过程分析

以正切刃齿尖端点 P 为研究对象，此时正切刃回转半径为最大值 R'_m，机组在作业时刀齿绕转动轴以角速度 ω(rad/s)做匀速圆周运动，同时跟随机组沿 X 轴方向以速度 v_0(km/h)做直线运动，如图 4 所示，则点 P 轨迹参数方程为

$$\begin{cases} X = v_0 t \\ Y = R'_m\sin(\omega t) \\ Z = -R'_m\cos(\omega t) \end{cases} \tag{7}$$

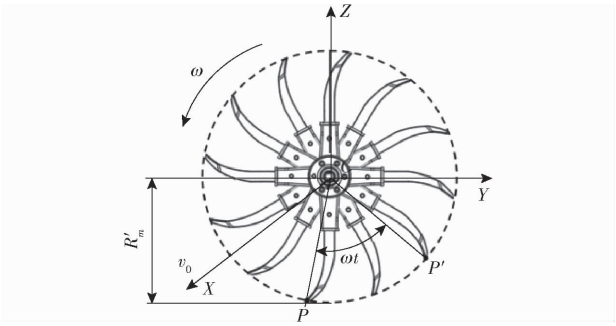

图 4　正切刃刀齿齿端运动分析

Fig. 4　Tangent blade tooth tip motion analysis

得到点 P 在各坐标轴速度分量为

$$\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = \omega R'_m\cos(\omega t) \\ v_z = \omega R'_m\sin(\omega t) \end{cases} \tag{8}$$

由此可得齿尖端点 P 在任意位置的瞬时速度为

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{v_0^2 + \omega^2 R_m'^2} \tag{9}$$

基于清茬防堵装置作业方式,要求正切刃一方面向前方未清秸区域前进,同时要向前进方向左侧抛撒根茬及土壤,此时齿尖运动轨迹曲线的切线与 XOZ 平面的夹角为螺旋升角,螺旋升角 ψ 计算式为

$$\psi = \arctan \frac{v}{\omega R_m'} \tag{10}$$

式中 v——作业速度,km/h

由式(10)可知机组作业速度、正切刃曲线参数以及清茬刀轴角速度对螺旋升角有直接影响。当作业速度一定时,齿尖线速度 R_m' 越大,螺旋升角 ψ 越小,越利于土壤及根茬向左侧抛出而非向前抛出。由此可知,当作业速度与刀轴转速一定时,可以通过改变正切刃曲线参数对防堵装置进行优化设计。

2.3 侧向清茬刀切茬节距分析

清茬刀的切茬节距是指相邻两个刀齿之间做切茬运动轨迹曲线的法向距离,切茬节距是影响清茬刀切茬质量重要指标,切茬节距 S_q 与机具前进速度、刀轴转速及刀齿个数等因素有关,切茬节距计算公式为

$$S_q = \frac{10^5 v}{60 z_d z_p n} \tag{11}$$

式中 z_d——每排刀齿数量,个

z_p——刀齿排数,排

n——清茬刀轴转速,r/min

由基础试验可知东北地区玉米主根茬直径大多在 30 ~ 50 mm,故切茬节距要至少满足 $S_q = 30$ mm 才可以保证将根茬清理出种床。将 $v = 10.8$ km/h、$z_d = 4$、$z_p = 3$、$S_q = 30$ mm 代入式(11)得到 $n = 500$ r/min。

2.4 正切刃切茬宽度分析

根据防堵装置实际设计要求及切茬节距作业需求,当正切刃切茬宽度(图 5)近似等于切茬节距时清茬效果最佳,正切刃切茬宽度不宜过大,正切刃切茬宽度过大($D > 50$ mm)会导致与相邻清茬刀轴上的刀齿相互干涉。

正切刃切茬宽度与正切刃折弯角度有关,正切刃切茬宽度为

$$D = H_1 \tan\varphi \tag{12}$$

其中 $$\varphi = 2\arctan \frac{H_0 - H_1}{R_z}$$

式中 H_0——正切刃长度,mm

H_1——正切刃工作长度,mm

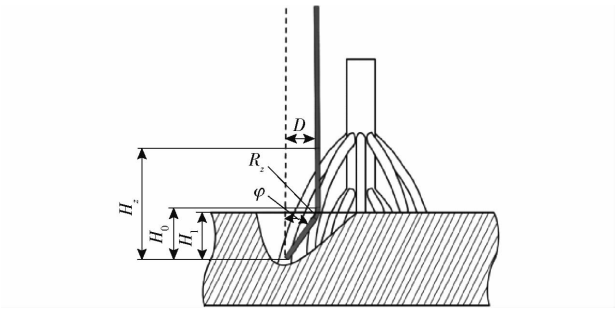

图 5 清茬刀切茬宽度示意图

Fig. 5 Stubble width of stubble blade

R_z——正切刃折弯半径,mm

由式(12)可得正切刃切茬宽度与正切刃长度、正切刃工作长度、正切刃折弯半径有关。根据东北地区玉米原茬地主根系平均深度 50 mm,本文设计的正切刃长度 $H_0 = 56$ mm,正切刃工作长度 $H_1 = 50$ mm,折弯半径为 20 mm,代入式(12)得正切刃折弯角 $\varphi = 33.39°$,此时切茬宽度 $D = 32.96$ mm,大于切茬节距 $S_q = 30$ mm。取极限切茬宽度 $D = 50$ mm,正切刃工作长度 $H_1 = 50$ mm,代入式(12)得到此时正切刃折弯角 $\varphi = 45°$。为方便加工选择正切刃折弯角 $\varphi = 30°$为试验中心水平,结合文献[21 - 22]正切刃折弯角选择 15° ~ 45°。

2.5 正切刃切土功耗分析

正切刃在切削土壤时受到的阻力如图 6 所示,主要包含土壤对正切刃前进方向的正向阻力 F_{N1}、土壤对正切刃切削方向的侧向阻力 F_{N2} 及土壤对正切刃的表面摩擦力 F_f。

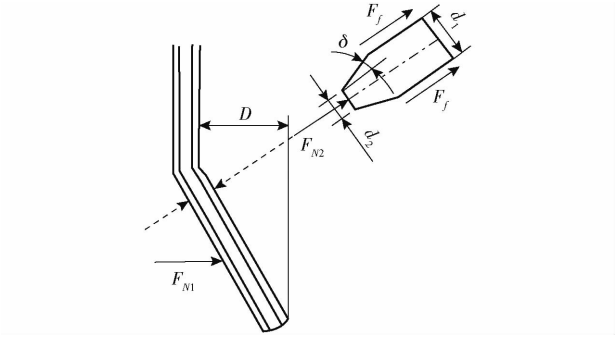

图 6 正切刃受力分析

Fig. 6 Force analysis of tangent edge

清茬刀正切刃在作业时来自前进方向的正向阻力 F_{N1} 计算公式为

$$F_{N1} = \frac{F_t}{n_c n_d} \tag{13}$$

式中 F_t——拖拉机牵引力,N

n_c——同一时刻单个刀轴刀齿入土数量,个

n_d——清茬刀轴数量,个

单个正切刃从切土开始 t_0 到结束 t_1 所做的功 W_1 为

$$W_1 = \frac{F_t v_0 (t_1 - t_0)}{n_c n_d} \tag{14}$$

土壤对正切刃切削方向的侧向阻力 F_{N2} 计算公式为

$$F_{N2} = D(\varepsilon d_1 + \sigma d_2) \tag{15}$$

式中　ε——土壤紧实度，MPa

σ——土壤抗压强度极限，MPa

d_1——刀齿厚度，mm

d_2——正切刃刃口厚度，mm

由于正切刃曲线较复杂，正切刃切土功耗采用微元积分法。在微单元时间段内土壤对正切刃切削方向的侧向阻力 F_{N2} 所做的微功为

$$\mathrm{d}W_2 = D(\varepsilon d_1 + \sigma d_2) v_p \mathrm{d}t \tag{16}$$

由式(16)可以得到正切刃开始切土到结束，侧向阻力 F_{N2} 做的功为

$$W_2 = D(\varepsilon d_1 + \sigma d_2) \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{v_0^2 + \omega^2 R_m'^2}\,\mathrm{d}t \tag{17}$$

土壤作用在正切刃上的表面摩擦力 F_f 的计算公式可近似表示为

$$F_f = \frac{\varepsilon f d_1 D}{f\cos\delta + \sin\delta} \tag{18}$$

式中　f——正切刃表面摩擦因数

δ——正切刃刃口角，(°)

在微单元时间段内土壤作用在正切刃上的表面摩擦力 F_f 所做的微功可近似表示为

$$\mathrm{d}W_3 = \frac{\varepsilon f d_1 D}{f\cos\delta + \sin\delta} v_p \mathrm{d}t \tag{19}$$

由式(19)可以得到正切刃开始切土到结束，侧向阻力 F_f 做的功为

$$W_3 = \frac{\varepsilon f d_1 D}{f\cos\delta + \sin\delta} \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{v_0^2 + \omega^2 R_m'^2}\,\mathrm{d}t \tag{20}$$

由式(14)、(17)、(20)可知正切刃在单个切削作业周期内做的总功耗为

$$P_z = \frac{W_1 + W_2 + 2W_3}{t_1 - t_0} \tag{21}$$

由式(21)可知，在土壤参数一定的情况下，正切刃刃口尺寸、正切刃曲线方程、清茬刀轴转速、作业速度对功耗有直接影响。

3　离散元仿真

为探究侧向清茬刀与根茬的相互作用规律，本文通过 EDEM 软件进行仿真分析，为后续田间试验验证提供依据。

3.1　仿真模型

3.1.1　土壤模型建立

基于土壤物理特性，根据试验仿真要求在 EDEM 建立土槽模型，土槽尺寸为 2 000 mm × 1 000 mm × 200 mm(长 × 宽 × 高)，为简化仿真计算量和时间，设置土壤颗粒半径为 3.5 mm。土壤颗粒之间的力学模型设置为 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型，土壤参数如表 1 所示[11,15,23]。

表 1　土壤模型参数

Tab.1　Parameters of soil model

参数	数值
泊松比	0.41
剪切模量/MPa	1.24
密度/(kg·m^{-3})	2 150
土壤-土壤恢复系数	0.6
土壤-土壤静摩擦因数	0.3
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.2
土壤-土壤法向接触粘结刚度/(N·m^{-3})	3.4×10^8
土壤-土壤切向接触粘结刚度/(N·m^{-3})	1.5×10^8
临界法向应力/Pa	2×10^5
临界切向应力/Pa	6.8×10^4
粘结半径/mm	3.9

3.1.2　根茬模型建立

使用 Solidworks 2017 软件建立根茬模型，如图 7 所示，使用抽壳指令将实心模型转为空心模型，保存为.step 格式文件，导入 EDEM 软件，将根茬模型设置为颗粒工厂填充半径为 1.3 mm 的根茬颗粒，为了更好的展现根茬与土壤之间的粘附情况，根茬颗粒与土壤颗粒之间采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型进行粘结，仿真参数见表 2。



图 7　根茬模型

Fig.7　Stubble model

3.1.3　清茬装置模型建立

使用 Solidworks 2017 软件建立清茬装置三维模型，如图 8 所示。清茬装置仿真参数如表 3 所示。

3.2　试验设计与评价指标

3.2.1　仿真试验设计

采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法，以正切刃折弯角、作业速度、刀轴转速为试验因素，结合团队前期研究及理论分析结果，设计试验因素编码如表 4 所示，离散元仿真系统模型如图 9 所示，仿真过程如图 10 所示。

表 2 根茬模型仿真参数

Tab. 2 Parameters of stubble simulation model

参数	数值
泊松比	0.33
剪切模量/MPa	6.393
密度/(kg·m^{-3})	107.6
根茬恢复系数	0.72
根茬静摩擦因数	0.6
根茬滚动摩擦因数	0.32
土壤-根茬恢复系数	0.6
土壤-根茬静摩擦因数	0.537
土壤-根茬滚动摩擦因数	0.21
根茬-根茬法向粘结刚度/(N·m^{-3})	1.034×10^{6}
根茬-根茬切向粘结刚度/(N·m^{-3})	1.034×10^{6}
临界法向应力/Pa	5×10^{5}
临界切向应力/Pa	5×10^{5}
粘结半径/mm	1.5
土壤-根茬粘结表面能/(J·m^{-2})	10

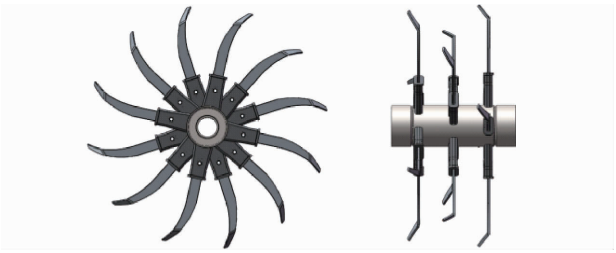

图 8 清茬装置模型

Fig. 8 Model of stubble clearing device

表 3 清茬装置模型仿真参数

Tab. 3 Parameters of stubble cleaning device model

参数	数值
泊松比	0.3
剪切模量/MPa	7.9×10^{4}
密度/(kg·m^{-3})	7 865
清茬刀-根茬恢复系数	0.6
清茬刀-根茬静摩擦因数	0.6
清茬刀-根茬滚动摩擦因数	0.05
清茬刀-土壤恢复系数	0.6
清茬刀-土壤静摩擦因数	0.51
清茬刀-土壤滚动摩擦因数	0.02

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and coding

编码	因素		
	正切刃折弯角 A/(°)	作业速度 B/(km·h^{-1})	刀轴转速 C/(r·min^{-1})
-1.682	15.0	7.2	300
-1	21.0	8.6	380
0	30.0	10.8	500
1	39.0	13.0	620
1.682	45.0	14.4	700

3.2.2 性能评价指标

根茬清除率:通过 EDEM 软件中 Grid Bin Group

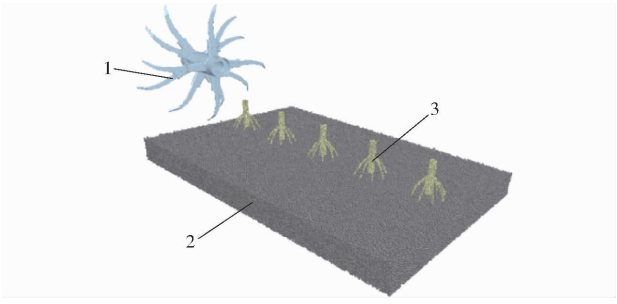

图 9 离散元仿真系统模型

Fig. 9 Discrete element simulation mode

1. 清茬装置 2. 土壤 3. 根茬

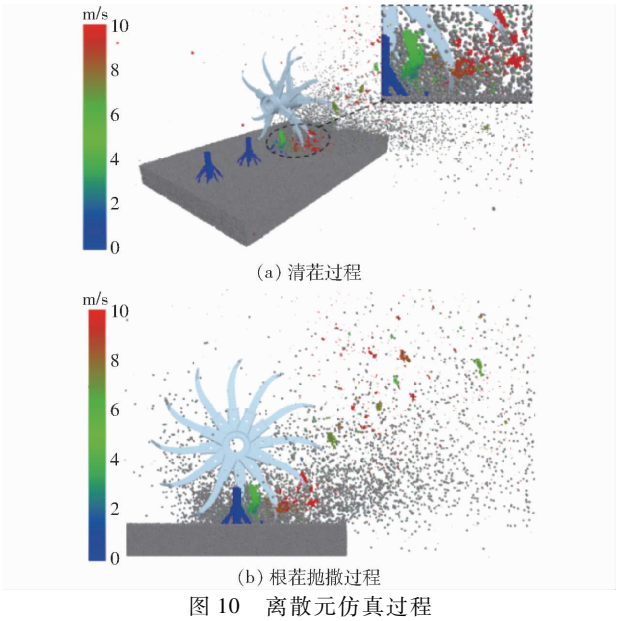

图 10 离散元仿真过程

Fig. 10 Discrete element simulation process

功能,选取 1 600 mm(长)×200 mm(宽)×230 mm(高)的网格,使用 Export Results Data 功能输出作业前与作业后网格内根茬颗粒的数量,计算根茬的清除比例。根茬清除率计算式为

$$\mu=\frac{n_0-n_1}{n_0}\times100\% \tag{22}$$

式中 μ——根茬清除率,%

n_0——作业范围内根茬总数,个

n_1——作业范围内根茬剩余量,个

土壤扰动率:通过 EDEM 软件后处理模块中 clipping 功能,分别选取距中心点前后 500 mm、深度 100 mm 的位置作为横截面,近似计算出清茬装置工作前后横截面积的百分比作为土壤扰动率,土壤扰动率计算式为

$$\eta=\frac{S_0-S_1}{S_0}\times100\% \tag{23}$$

式中 η——土壤扰动率,%

S_0——作业前土壤横截面积,mm^2

S_1——作业后土壤横截面积,mm^2

当量功耗:提取仿真过程中每个步长中施加到

清茬装置的扭矩，根据扭矩、转速和当量功耗的关系，计算得出清茬装置的当量功耗为

$$P = \frac{Tn}{9\,550} \tag{24}$$

式中　P——当量功耗，kW

T——仿真总转矩，N·m

3.3　试验结果与分析

3.3.1　回归模型建立与方差分析

仿真试验结果如表 5 所示，运用 Design-Expert 软件对清茬装置仿真结果进行回归分析与显著性检验。

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test design and results

序号	因素			评价指标		
	正切刃折弯角 A/(°)	作业速度 B/(km·h^{-1})	刀轴转速 C/(r·min^{-1})	根茬清除率 Y_1/%	土壤扰动率 Y_2/%	当量功耗 Y_3/kW
1	21.0	8.6	380	93.63	27.19	9.22
2	39.0	8.6	380	94.54	34.76	9.67
3	21.0	13.0	380	89.93	21.48	9.85
4	39.0	13.0	380	92.01	25.95	10.39
5	21.0	8.6	620	95.91	33.61	10.54
6	39.0	8.6	620	95.67	40.69	11.79
7	21.0	13.0	620	93.91	36.39	11.08
8	39.0	13.0	620	94.93	36.93	13.72
9	15.0	10.8	500	92.51	29.85	9.28
10	45.0	10.8	500	95.83	38.43	11.67
11	30.0	7.2	500	95.17	37.27	8.82
12	30.0	14.4	500	92.23	25.25	11.26
13	30.0	10.8	300	91.13	18.89	9.99
14	30.0	10.8	700	95.27	36.71	13.71
15	30.0	10.8	500	93.11	30.79	11.13
16	30.0	10.8	500	93.55	32.19	10.65
17	30.0	10.8	500	93.28	29.97	10.76
18	30.0	10.8	500	93.24	31.27	11.10
19	30.0	10.8	500	93.37	30.34	10.76
20	30.0	10.8	500	94.25	30.38	10.67
21	30.0	10.8	500	93.29	31.54	10.86
22	30.0	10.8	500	93.56	29.65	10.65
23	30.0	10.8	500	93.61	32.83	10.91

(1)根茬清除率

根茬清除率试验方差分析如表 6 所示。A、B、C、BC 对根茬清除率影响极显著，AB 以及 A^2 对根茬清除率影响显著，各因素的影响主次顺序为 C、B、A，在 $R^2 = 0.93$ 时剔除不显著因素后的根茬清除率二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 108.1 - 0.18A - 2.49B + 0.003C + 0.02AB + 0.002BC + 0.003A^2 \tag{25}$$

表 6　根茬清除率方差分析

Tab. 6　Variance analysis of stubble removal rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	46.71	9	33.07	<0.000 1 **
A	6.41	1	40.81	<0.000 1 **
B	14.18	1	90.32	<0.000 1 **
C	21.85	1	139.18	<0.000 1 **
AB	0.74	1	4.70	0.049 3 *
AC	0.61	1	3.89	0.070 2
BC	1.52	1	9.70	0.008 2 **
A^2	1.16	1	7.37	0.017 7 *
B^2	0.17	1	1.09	0.316 3
C^2	0.085	1	0.54	0.474 6
残差	2.04	13		
失拟项	1.14	5	2.01	0.180 8
误差	0.90	8		
总和	48.75	22		

注：* 表示差异显著($0.01 < P < 0.05$)，** 表示差异极显著($P \leqslant 0.01$)。下同。

(2)土壤扰动率

土壤扰动率试验方差分析如表 7 所示。A、B、C、BC、A^2 对土壤扰动率影响极显著，AB、C^2 对土壤扰动率影响显著，其余交互项与二次项对响应值影响不显著，各因素影响主次顺序是 C、B、A，在 $R^2 = 0.94$ 时剔除不显著因素后的土壤扰动率二次多项式回归模型为

$$Y_2 = 33.54 + 0.29A - 4.56B + 0.04C - 0.07AB + 0.007BC + 0.02A^2 - 0.006C^2 \tag{26}$$

表 7　土壤扰动率方差分析

Tab. 7　Variance analysis of soil disturbance rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	599.24	9	36.53	<0.000 1 **
A	85.09	1	46.69	<0.000 1 **
B	93.40	1	51.25	<0.000 1 **
C	340.67	1	186.91	<0.000 1 **
AB	11.62	1	6.37	0.025 4 *
AC	2.44	1	1.34	0.267 9
BC	22.92	1	12.57	0.003 6 **
A^2	28.12	1	15.43	0.001 7 **
B^2	1.55	1	0.85	0.373 6
C^2	13.19	1	7.24	0.018 5 *
残差	23.69	13		
失拟项	14.82	5	2.67	0.104 5
误差	8.88	8		
总和	622.94	22		

(3)当量功耗

当量功耗试验方差分析如表 8 所示。A、B、C、AC、B^2、C^2 对当量功耗影响极显著，AB 对当量功耗影响显著，各因素的影响主次顺序是 C、A、B，在

$R^2=0.96$ 时剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3=7.19-0.12A+1.23B-0.03C+0.01AB+3.37\times10^{-4}AC-0.07B^2+0.025\,2C^2 \quad (27)$$

表 8 当量功耗方差分析

Tab. 8 Variance analysis of power consumption

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	30.34	9	58.11	<0.000 1 **
A	5.80	1	99.79	<0.000 1 **
B	4.60	1	79.22	<0.000 1 **
C	14.90	1	256.41	<0.000 1 **
AB	0.28	1	4.78	0.047 7 *
AC	1.05	1	18.12	0.000 9 **
BC	0.16	1	2.73	0.122 3
A^2	0.26	1	4.42	0.055 5
B^2	1.26	1	21.69	0.000 4 **
C^2	2.06	1	35.36	<0.000 1 **
残差	0.76	13		
失拟项	0.49	5	2.88	0.088 7
误差	0.27	8		
总和	31.15	22		

3.3.2 响应面分析

利用 Design-Expert 软件对仿真试验结果进行处理分析，得到正切刃折弯角、作业速度、刀轴转速之间的交互作用对根茬清除率、土壤扰动率和当量功耗影响的响应曲面。

（1）根茬清除率

作业速度和正切刃折弯角对根茬清除率的影响规律如图 11a 所示，当刀轴转速一定时，随着作业速度逐渐增大，根茬清除率逐渐降低，主要原因是作业速度增大时，刀齿切茬节距变大，导致部分根茬未受到打击，这与实际田间作业情况一致。当作业速度一定时，根茬清除率随着正切刃折弯角的增大逐渐增大，主要原因是随着正切刃折弯角增大，清茬刀的切茬宽度变大，使得清茬刀与根茬接触的面积增大，根茬清除率随之增大。刀轴转速和作业速度对根茬清除率的影响规律如图 11b 所示，当作业速度一定时，根茬清除率随着刀轴转速的增大而增大，主要是由于随着刀轴转速的增大，相同时间段内刀齿对根茬的打击频率增加，根茬清除率增大。

（2）土壤扰动率

作业速度和正切刃折弯角对土壤扰动率的影响规律如图 11c 所示，当正切刃折弯角一定时，土壤扰动率随作业速度增大而减小，主要原因是在刀轴转速一定时，随着作业速度的增加，在刀轴上均匀分布的清茬刀运动轨迹发生改变，切土间距随着作业速度的增大逐渐增大，在相同作业区域内刀齿打击土壤次数减少，土壤扰动率随之减小。当作业速度一定时，土壤扰动率随着正切刃折弯角的增大而增大，主要原因是折弯角增大，刀齿与土壤接触面积增大，土壤扰动率增大。

刀轴转速和作业速度对土壤扰动率的影响规律如图 11d 所示，当作业速度一定时，土壤扰动率随着刀轴转速增大而逐渐增大，主要原因是刀轴转速增加，刀齿打击土壤的频率增大，土壤扰动率随之增大。

（3）当量功耗

作业速度和正切刃折弯角对当量功耗的影响规律如图 11e 所示，当正切刃折弯角一定时，当量功耗随作业速度的增大而增大，主要原因是机具前进速

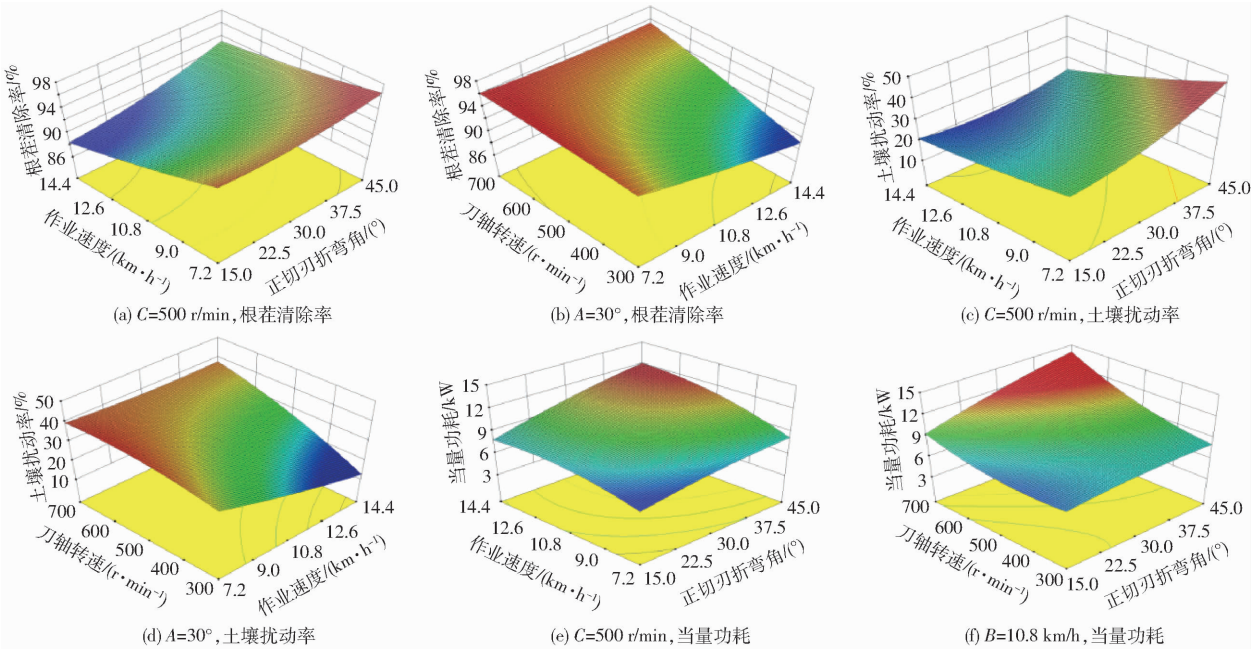

图 11 各因素对性能指标影响的响应曲面

Fig. 11 Influence of various factors on performance evaluation index

度过大，导致机组牵引功耗增大，作业总功耗增大。当作业速度较小时，当量功耗随着正切刃折弯角的增大而增大，总体变化不明显，主要原因是当作业速度较小时，随着正切刃折弯角增大，刀齿对土壤的切削作用增加，阻力变化不明显，随着作业速度逐渐增大，刀齿前方出现壅土现象，重复切削土壤导致作业功耗增加。

3.3.3　参数优化

根据实际作业条件和工作要求，选择目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \min Y_3(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 15° \leqslant A \leqslant 45° \\ 7.2\ \text{km/h} \leqslant B \leqslant 14.4\ \text{km/h} \\ 300\ \text{r/min} \leqslant C \leqslant 700\ \text{r/min} \\ 80\% \leqslant Y_1 \leqslant 100\% \\ 15\% \leqslant Y_2 \leqslant 45\% \\ 5\ \text{kW} \leqslant Y_3 \leqslant 15\ \text{kW} \end{cases} \end{cases} \tag{28}$$

应用 Design-Expert 软件进行多目标优化求解，得到最优工作参数组合为：正切刃折弯角 34.5°、作业速度 14.4 km/h、转速 380 r/min，此时根茬清除率为 90.7%，土壤扰动率为 19.37%，功耗为 10.34 kW。

4　田间试验

4.1　试验条件与仪器设备

试验于 2023 年 11 月在黑龙江省东北农业大学向阳基地进行。条件为机收未经粉碎处理玉米原茬地，作物种植模式为垄距 650 mm 标准垄，玉米残茬覆盖量 1.73 kg/m^2，平均留茬高度 400 mm，秸秆平均含水率 20.24%，深度 0 ~ 10 cm 平均土壤硬度为 20.8 kg/cm^2，平均土壤含水率为 15.38%。

试验仪器设备主要有：2BMFJ－2 型免耕覆秸精播机清茬防堵装置、东方红 604 型拖拉机、TZS－1 型土壤水分测定仪、PV6.08 型贯穿阻力仪、TPJ－21 型土壤温度记录仪、ACS－30 型电子秤、田间机械动力学参数遥测仪、扭矩传感器、VICTOR6234P 型转速表、皮尺、卷尺、直尺及数码相机等。田间试验过程如图 12 所示。



(a) 仪器与设备连接　(b) 田间试验　(c) 作业效果　(d) 清茬效果

图 12　仪器设备与田间试验

Fig. 12　Instrumentation and field experiments

1. 牵引拖拉机　2. 扭矩传感器　3. 田间机械动力学参数遥测仪　4. 清茬防堵装置样机

4.2　评价指标测定方法

(1) 根茬清除率

根茬清除率是以作业幅宽内根茬清除比例来衡量。选取 50 m 作业距离作为每个处理取样长度，作业之前统计根茬数量，作业之后统计未被清除根茬数量，取 3 组数据平均值为最终试验结果。根茬清除率计算式为

$$\mu_t = \frac{n_q - n_h}{n_q} \times 100\% \tag{29}$$

式中　μ_t——田间试验根茬清除率，%

n_q——作业范围内根茬总数，个

n_h——作业范围内根茬剩余量，个

(2) 土壤扰动率

免耕播种作业要求土壤扰动率要小，为了便于测量，以侧向清茬刀回转平面内切削土壤横截面积作为土壤扰动率评价关键参数，以垄剖切横断面面积与完整垄横截面积百分比作为土壤扰动率，土壤扰动率计算式为

$$\eta_t = \frac{S_1}{S_0} \times 100\% \tag{30}$$

式中　η_t——田间试验土壤扰动率，%

(3) 当量功耗

当量功耗是每个种床整备单元组刀轴旋转作业消耗的功率，通过田间机械动力学参数遥测仪读取，功耗计算式为

$$P_t = \frac{Mn + Fv}{2} \tag{31}$$

式中　M——扭矩传感器所测扭矩，N·m

F——拉力传感器所测牵引力之和，N

P_t——田间试验单个刀轴作业功耗，kW

4.3　验证试验

为验证离散元仿真的正确性，以正切刃折弯角为 34.5°的清茬刀，在作业速度 14.4 km/h、刀轴转速 380 r/min 的条件下实施田间试验，试验均重复 3 次取均值，试验结果如表 9 所示，根茬清除率为 91.6%，土壤扰动率为 26.6%，当量功耗为 12.62 kW。根茬清除率测量结果与仿真试验基本一致。

表 9 验证试验结果

Tab. 9 Results of verification experiment

序号	根茬清除率/%	土壤扰动率/%	当量功耗/kW
1	91.5	27.7	13.11
2	92.1	25.9	12.04
3	91.2	26.2	12.71
平均值	91.6	26.6	12.62

4.4 对比试验

对比优化后正切刃折弯侧向清茬刀与优化前侧向清秸圆弧刀作业性能差异,将刀齿安装在防堵装置上,刀齿入土深度 50 mm,刀轴转速 380 r/min,在作业速度 10.8、12.6、14.4 km/h 的条件下进行测试(图 13),试验均重复 3 次取平均值。对两种刀齿进行单因素方差分析,其中作业速度 14.4 km/h 的方差分析结果如表 10 所示。



(a) 侧向清茬刀 (b) 侧向清秸圆弧刀

图 13 田间对比试验

Fig. 13 Field contrast test

表 10 对比试验比较

Tab. 10 Comparative test multiple comparisons

评价指标	刀齿类型	平均差异	标准误差	P	95% 置信区间	
					下限	上限
根茬清除率	圆弧刀 - 侧向清茬刀	-10.33	0.313	<0.001**	-11.202	-9.465
土壤扰动率	圆弧刀 - 侧向清茬刀	-1.83	0.233	0.003**	-2.481	-1.186
当量功耗	圆弧刀 - 侧向清茬刀	-1.06	0.177	0.005**	-1.55	-0.57

对比试验结果表明,侧向清茬刀和圆弧刀在根茬清除率、土壤扰动率和功耗方面均存在显著性差异,因此在提高根茬清除率的同时会导致土壤扰动率和功耗提升。侧向清秸圆弧刀平均根茬清除率为 84.9%、83.5%、81.3%,侧向清茬刀田间试验根茬清除率在 3 种作业速度条件下平均值分别为 94.1%、92.7%、91.6%。相比于圆弧刀,清茬刀的根茬清除率分别提升 10.84%、11.02%、12.67%,结果表明在高速作业时安装侧向清秸圆弧刀可以基本实现对工作区域内根茬的清理,安装侧向清茬刀可以实现对作业区域内根茬的高效清理。侧向清茬刀在 3 种作业速度条件下土壤扰动率平均值较圆弧刀分别提升 9.5%、8.2%、7.3%,功耗分别提升 8.1%、8.6%、9.2%,其主要原因是清茬刀正切刃相对圆弧刀对土壤及根茬作用面积增加,导致土壤扰动率及功耗略微增大,但依然满足田间作业要求。

5 结论

(1)设计了一种适用于东北地区机收玉米原茬地免少耕高速(≥14 km/h)精播种作业侧向清茬刀,采用正切刃对根茬进行切削粉碎,揭示了切刃折弯角、作业速度和刀轴转速对根茬清除率、土壤扰动率和当量功耗性能评价指标的影响规律。

(2)仿真试验结果表明,当正切刃折弯角 34.5°、作业速度 14.4 km/h、转速 380 r/min 时根茬清除率为 91.2%,土壤扰动率为 20.24%,当量功耗为 11.08 kW。

(3)田间试验结果表明,在作业速度 14.4 km/h、转速 380 r/min、刀齿入土深度 50 mm 的条件下,侧向清茬刀正切刃折弯角为 34.5°时,根茬清除率为 91.6%、土壤扰动率为 26.6%、当量功耗为 12.62 kW,安装优化清茬刀的清茬装置对比安装侧向清秸刀齿的根茬清除率提高 12.67%。

参 考 文 献

[1] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)

[2] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 1-15.
WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 1-15. (in Chinese)

[3] 姚文燕. 麦—玉轮作区玉米免耕播种主动防堵技术研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
YAO Wenyan. Research on active anti-blocking technology of no-tillage seeding of corn in wheat-corn rotation area[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

[4] 赵宏波,何进,郑智旗,等. 少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):24-34.
ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 24-34. (in Chinese)

[5] 姚文燕,赵殿报,徐广飞,等. 条带对行主动式玉米免耕播种防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊2):55 - 62,71.
YAO Wenyan,ZHAO Dianbao,XU Guangfei,et al. Design and experiment of anti-blocking device for strip to row active corn no-tillage seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 2):55 - 62,71. (in Chinese)

[6] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7):111 - 122.
HOU Shouyin,JI Zhangchi,XUE Donghui,et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):111 - 122. (in Chinese)

[7] 史乃煜,陈海涛,王星,等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4):84 - 91.
SHI Naiyu,CHEN Haitao,WANG Xing,et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):84 - 91. (in Chinese)

[8] 林静,李宝筏,李宏哲. 阿基米德螺线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 10 - 19.
LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of Archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 10 - 19. (in Chinese)

[9] 贾洪雷,刘行,佘海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 68 - 77.
JIA Honglei,LIU Hang,YU Haibo,et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):68 - 77. (in Chinese)

[10] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 36 - 44.
CAO Xinpeng,WANG Qingjie,LI Hongwen,et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):36 - 44. (in Chinese)

[11] 王加一,赵淑红,高连龙,等. 玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(11): 59 - 67.
WANG Jiayi,ZHAO Shuhong,GAO Lianlong,et al. Design and experiment of passive disc cutting blade in corn ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):59 - 67. (in Chinese)

[12] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 19 - 27, 37.
LIN Jing,LÜ Zhouyi,LI Hongzhe,et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(6):19 - 27,37. (in Chinese)

[13] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 59 - 69.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 59 - 69. (in Chinese)

[14] 刘俊孝,王浩,王庆杰,等. 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 132 - 140.
LIU Junxiao,WANG Hao,WANG Qingjie,et al. Design and experiment of strip cleaning device of no and minimum-tillage corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):132 - 140. (in Chinese)

[15] 王加一. 玉米条带式直灭茬刀设计及耕作阻力与抛撒机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
WANG Jiayi. Design of corn strip-type straight stubble-breaking blade and study on tillage resistance and throwing mechanism [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2022. (in Chinese)

[16] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 基于 EDEM - ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10 - 22.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM - ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10 - 22. (in Chinese)

[17] 王立宗,廖庆喜,李蒙良,等. 油菜高速免耕直播机驱动型开畦沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(19):15 - 26.
WANG Lizong, LIAO Qingxi, LI Mengliang, et al. Drive-type ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 15 - 26. (in Chinese)

[18] 陈海涛,侯磊,侯守印,等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(8): 59 - 67.
CHEN Haitao,HOU Lei,HOU Shouyin,et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8): 59 - 67. (in Chinese)

[19] 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7):96 - 102.
CHEN Haitao,ZHA Shaohui,DUN Guoqiang,et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):96 - 102. (in Chinese)

[20] 陈海涛,魏志鹏,苏文海,等. 前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 51 - 60, 73.
CHEN Haitao,WEI Zhipeng,SU Wenhai,et al. Design and experiment of cleaning and anti-blocking of frontmounted seed bed preparation device for grand ridge with raw stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(10):51 - 60,73. (in Chinese)

(下转第 201 页)

quadric method[J]. Acta Phys. Sin.,2018,67(9):182 – 193. (in Chinese)
[8] 曾荣,李东东,祝英豪,等.旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用[J].农业机械学报,2020,51(5):88 – 97.
ZENG Rong, LI Dongdong, ZHU Yinghao, et al. Design and application of performance test bench for rotary tiller components [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):88 – 97. (in Chinese)
[9] 刘全威.高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2018.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism of high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University,2018. (in Chinese)
[10] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等.玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J].农业机械学报,2023,54(7):156 – 166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):156 – 166. (in Chinese)
[11] 姜雨. 砂土、粘土的力学性质及本构参数统一表征试验研究[D].苏州:苏州科技大学,2022.
JIANG Yu. Study on unified characterization of mechanical properties and constitutive parameters of sand and clay[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2022. (in Chinese)
[12] 陶力铭. 盾构刀盘-土壤界面粘附机理试验研究[D].重庆:西南交通大学,2021.
TAO Liming. Experimental study on the adhesion mechanism of shield cutterhead – soil interface[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University,2021. (in Chinese)
[13] 徐天月.精密播种单体及其关键部件工作过程的试验研究与仿真分析[D].长春:吉林大学,2019.
XU Tianyue. Experimental study and simulation analysis on the working process of the precision seeding unit and its key parts [D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)
[14] 闫东旭.大豆种子颗粒建模及投种、覆土镇压过程的仿真分析与试验研究[D].长春:吉林大学,2022.
YAN Dongxu. Particle modelling of soybean seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-throwing and pressing[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[15] 任兴华.基于离散元的花生播种单体仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
REN Xinghua. Simulation analysis and experimental study of peanut seeding monomer based on discrete element[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2023. (in Chinese)
[16] 周龙.基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[17] 张宁.玉米籽粒收获机鱼鳞筛清选装置工作机理及优化分析[D]. 长春:吉林大学,2022.
ZHANG Ning. Research on working mechanism and optimization analysis of chaffer sieve cleaning device in corn grain harvester[D]. Changchun: Jilin University,2022. (in Chinese)
[18] 郭海钦.油莎豆播种机关键部件设计与试验研究[D].郑州:河南农业大学,2022.
GUO Haiqin. Design and experimental study of key components of *Cyperus esculentus* seeder[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2022. (in Chinese)
[19] 何晓宁,张方焱,尚书旗,等.油莎豆联合收获机合页筛片式升运装置设计与试验[J].农业机械学报,2024, 55(5):148 – 157.
HE Xiaoning, ZHANG Fangyan, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of hinge lifting device of *Cyperus esculentus* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(5):148 – 157. (in Chinese)
[20] 张宁,徐继康,张广军,等.花生分层施肥旋耕起垄播种机:CN202311498265.4[P]. 2024 – 01 – 26.
[21] 季顺迎,樊利芳,梁绍敏.基于离散元方法的颗粒材料缓冲性能及影响因素分析[J].物理学报,2016,65(10):168 – 180.
JI Shunying, FAN Lifang, LIANG Shaomin. Buffer capacity of granular materials and its influencing factors based on discrete element method[J]. Acta Phys. Sin.,2016,65(10):168 – 180. (in Chinese)

(上接第 173 页)

[21] 高建民,刘兴达,齐惠冬,等.斜置潜土逆转旋耕抛土仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 54 – 63.
GAO Jianmin, LIU Xingda, QI Huidong, et al. Simulation and experiment of soil casting during oblique submerged reversely rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 54 – 63. (in Chinese)
[22] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等.免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8):42 – 52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):42 – 52. (in Chinese)
[23] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等.基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53 – 62.
ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, YUAN Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53 – 62. (in Chinese)